

Josef ALDORF<sup>1</sup>, Lukáš ĎURIŠ<sup>2</sup>

## ZHODNOCENÍ ZKUŠENOSTÍ S MODELOVÁNÍM HLUBOKÝCH STAVEBNÍCH JAM

### EVALUATION OF EXPERIENCE IN MODELLING OF DEEP FOUNDATION PITS

#### Abstrakt

Zakládání nových staveb uprostřed městské zástavby s sebou přináší mnoho komplikací. Pro maximální využití prostoru jsme nuceni zakládat ve větších hloubkách, což přináší obtíže se zajištěním takovýchto stavebních jam. K řešení stability a založení objektu můžeme využít i prostředků matematického modelování. U komplikovaných staveb se vyplatí využít prostorových modelů. Požívání těchto prostředků ovšem vyžaduje určité zkušenosti uživatele.

#### Klíčová slova

Stavební jáma, MKP, Plaxis.

#### Abstract

Foundation of new buildings in the middle of urban areas brings many challenges. For maximum utilization of space, we have to choose greater depth for foundations, resulting in difficulties with stabilization of foundation pits. For analysis of foundation structure and stability of pit can be used tools of mathematical modeling. For complex structures it pays to take advantage of 3D modeling. The enjoyment of these techniques, however, requires some user experiences.

#### Keywords

Foundation pit, FEM, Plaxis.

## 1 ÚVOD

Budování nových objektů a využívání volných ploch s sebou přináší nutnost zakládat objekty ve složitých podmínkách. Pro využití místa se často buduje i rozsáhlá podzemní část pod objekty. Potom je nutné zakládat ve větších hloubkách a budovat stavební jámy. Obvykle se dostáváme do hloubek 7 až 10 m pod povrchem. Zajištění stability takto hlubokých stavebních jam je poměrně složité, zejména tehdy, když nelze pažící konstrukce kotvit, a je nutné zajistit vodotěsnost pažící konstrukce. Téměř úplně můžeme vyloučit svahované stavební jámy, pro které v husté zástavbě není místo. Ideálním řešením je záporové pažení, nebo podzemní stěny. Při hloubce větší než 4 m je obvykle nutné stěnu kotvit či rozepřít přes ocelové převázky. Obecně ji lze realizovat do hloubky 10 m, maximálně do 20 m při rozdělení lavičkami. Využívá se především pro pažení stěn výkopu nad úrovní hladiny podzemní vody nebo tam, kde je základová spára nepříliš ponořená pod hladinu podzemní vody a nehrozí, že při odčerpávání přítoků do stavební jámy dojde k porušení stability okolních objektů vynášením jemných částic z jejich podzákladí (tj. sufozí či vnitřní erozí).

---

<sup>1</sup> prof. Ing. Josef Aldorf DrSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321945, e-mail: josef.aldorf@vsb.cz.

<sup>2</sup> Ing. Lukáš Ďuriš, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321948 e-mail: lukas.duris@vsb.cz.

Mikrozáporové pažení představuje pažící, zpevňující a stabilizující konstrukci, která však svou funkci plní pouze dočasně. Téměř vždy je nutné jej rozpírat, případně kotvit za pomoci ocelových převázek. Této technologie se využívá ve stísněných podmínkách městské zástavby a při rekonstrukcích ve špatně přístupných prostorech, ale pouze pro mělké výkopy. Jako dočasné či trvalé pažící konstrukce, které by měly plnit i funkci těsnící, se využívají štětové stěny. Zabraňují průtoku vody, zachycují hydrostatický tlak a umožňují tak vodotěsné uzavření výkopu. Jejich instalace beraněním či vibroberaněním představuje značnou nevýhodu v městské aglomeraci, neboť vznikající otřesy mohou mít negativní vliv na okolní zástavbu. Důležitou podmínkou pro použití štětovnicového pažení jsou vhodné geologické podmínky. Převrtávané pilotové stěny jsou jednou z variant, kterou lze i bez dalších opatření považovat za těsnící, a používá se tak v nesoudržných zeminách pro zajištění stavebních jam, jejichž dno leží pod hladinou podzemní vody. Pilotové stěny se navrhují buď jako volně stojící, tzn. nekotvené, nebo v případě větších hloubek jako kotvené, zřídka i rozepřené.

Jednu z nejmladších metod pro trvalé pažení a těsnění stavebních jam představují stěny z tryskové injektáže. Jelikož jsou velice nákladné, využívají se pouze lokálně v místech, kde není možné jiné řešení, a především k podchycování stávajících základů ke stavební jámě přiléhajících budov. Podle geotechnických poměrů na staveništi a požadovaného geometrického tvaru prvků se využívá jednofázového, dvojfázového či trojfázového systému provádění. Pro trvalé pažení rozsáhlých stavebních jam se čím dál častěji používají podzemní stěny (tzv. milánské stěny), které obvykle plní i funkci těsnící. Navíc mohou být využity jako nosné konstrukce podzemní části objektu a přenášet zatížení od horní stavby. Nejčastěji se realizují jako monolitické, v opodstatněných případech jako prefabrikované, výjimečně jako čistě těsnící ze samotvrdnoucí suspenze. Podzemní stěny je možné kotvit, respektive rozpírat v jedné i více úrovních [1, 4, 3].

## 2 MODELOVÁNÍ STAVEBNÍCH JAM

Pro komplexní řešení návrhu stavební jámy a sedání objektů se v dnešní době poměrně často využívá matematického modelování a v geotechnické praxi zejména metody konečných prvků. Při výpočtu a posuzování složitých objektů je vhodné využít zejména prostorových modelů, které umožňují reálnější přístup a přípravu geotechnického modelu. Pro modelování stavebních jam je vhodné využít speciálních programů. Jedním z takovýchto je například program Plaxis 3D Foundation, pro prostorové modelování.

Prostorové modely, jak je zvykem u 3D Plaxis programů, vznikají „protažením“ rovinného modelu do třetího rozměru. Rovinný model je potřeba sestavit na základě podkladů dané situace. Vytvořením základního půdorysu geometrie modelu, využíváme půdorys do všech dalších pracovních rovin. Tyto pracovní roviny jsou definovány uživatelem opět podle potřeby, díky tomu si můžeme snadno definovat např. hloubku stavební jámy, případně délku piloty, úroveň základové spáry, různé hloubky založení, apod. Pracovní roviny nesouvisejí s geologickou skladbou. Program je speciálně zaměřen na zakládání, a proto obsahuje speciální geometrické prvky, které usnadňují práci při vytváření modelů. Jedná se zejména o prvky pro stěnové konstrukce (wall), základové desky (floor), piloty (pile). Pomocí těchto desko-stěnových prvků můžeme vytvořit například nosnou konstrukci budovy, která bude založena ve stavební jámě i nad ní. Konstrukce mohou být zatíženy třemi druhy zatížení. Jedná se o plošné, liniové a bodové zatížení. Nově byla přidána i možnost použití zemních kotev. Po vytvoření pracovních úrovní, které nám slouží k simulaci pracovních hloubek je potřeba nadefinovat i horninové prostředí. K tomu nám slouží funkce vrt (borehole), kde definujeme podle mocností jednotlivých vrstev rozhraní mezi zeminami. Vrtů může být i více a program sám interpolací stanoví tvar průběhů jednotlivých vrstev a také zde můžeme určit hladinu podzemní vody. Velikost respektive hloubku modelu stanovíme podle zvolené délky vrtu. Dostatečná hloubka nám zajistí správnost výpočtu bez ovlivnění okrajovými podmínkami. Okrajové podmínky modelu jsou automaticky přiřazeny a není možné je měnit.

Tvorba sítě je zajištěna automatickým generátorem jak v rovinně tak následně v prostoru. Geometrie je rozdělena 15 uzlovými klínovými prvky. Ty jsou tvořeny 6 bodovými trojúhelníky a 8 uzlovými čtyřúhelníky. Toto dělení je nastaveno pevně a nelze ho změnit. Kvalita sítě se dá

ovlivnit pouze hustotou a to jak v rovině, tak i ve třetím směru. Po vytvoření geometrie je možno spustit kalkulačního programu pro výpočet. V kalkulačním programu definujeme fáze modelování, vkládání prvků, odtěžení zeminy apod. Délka výpočtu je výrazně ovlivněna hustotou sítě konečných prvků a složitostí a velikostí modelu. Pomocí postprocesoru si můžeme zobrazit vypočtené výsledky deformací, přetvoření a napětí. Deformace se dají zobrazit samostatně v jednotlivých směrech nebo jako totální hodnota. Můžeme zobrazovat i hodnoty rozdílů deformací od předchozích fází apod. Napětí se zobrazují jako totální a efektivní, případně je možno zobrazit i hodnotu pórových tlaků.

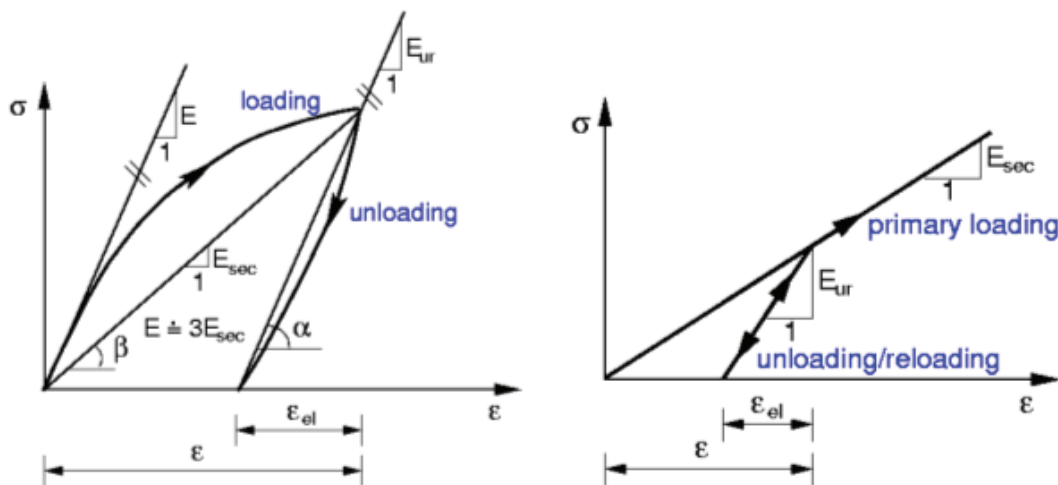
### 3 VSTUPNÍ PODMÍNKY MODELU

Chování zemního prostředí lze simulovat různými konstitutivními modely jako např. lineární: Mohr Coulomb, Hardening soil model, Soft soil creep. Základním a nejčastěji používaným je Mohr-Coulombový model. Tento elasto-plastický model vyžaduje několik základních vstupů a to zejména deformační modul  $E$  a Poissonovo číslo  $\nu$ , a dále smykové parametry zeminy ( $c$  a  $\phi$ ). Předpoklad tohoto modelu je ideální plasticita. Při použití tohoto modelu se uvažuje konstantní tuhost v každé vrstvě. Využití této konstantní tuhosti je pro rychlé stanovení deformací. Deformační modul nám ovlivňuje zejména deformace. Hodnota deformačního modulu je velice důležitá a její stanovení se prakticky musí zohlednit podle dané úlohy, a zda se jedná o zatěžování nebo odlehčování. Pro zatěžování, jako je například základ, násyp a podobně je potřeba uvažovat modul  $E_{oed}$  nebo  $E_{50}$  z triaxiální zkoušky. Pro odlehčování co je případ například tunelování nebo výkop je potřeba uvažovat modul  $E_{ur}$  (Unloading/Reloading), který je stanoven ze zatěžovacích a odlehčovacích cyklů (viz obr. č. 1). Tuhost podle odlehčení/zatížení ( $U/R$ ) je vyšší než pro zatížení.

Stanovení jednotlivých modulů je pak následné:

$$E_{def} = \tan \beta = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon$$

$$E_{ur} = \tan \alpha = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon^{el} \quad (1)$$

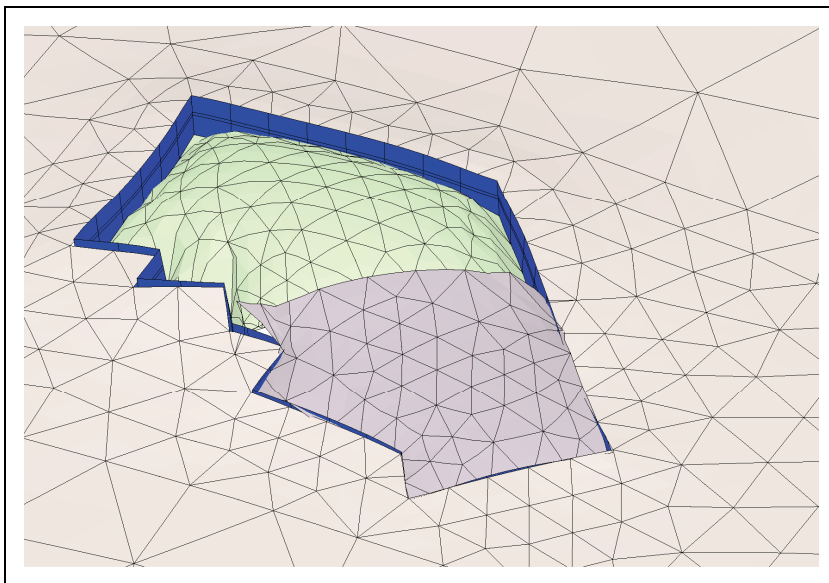


Obr. 1: Napěťo-deformační diagram (převzato z [www.fine.cz](http://www.fine.cz))

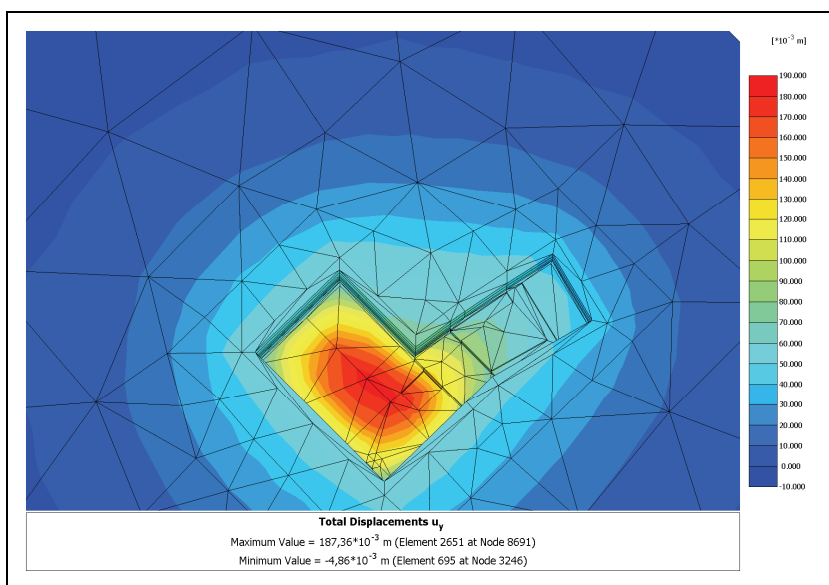
Hodnota Poissonova čísla je dána na základě výsledků triaxiálních zkoušek. Tato hodnota je důležitá pro stanovení koeficientu bočního tlaku  $K_0$  při gravitačním zatížení. Obvykle se hodnoty pohybují mezi 0,25 až 0,45. Toto je opět hodnota vhodná pro modely se zatížením vycházející z jednoosého zatížení. Pro odlehčovací podmínky je vhodné použití hodnot v rozmezí mezi

0,15 až 0,25. Doporučení vychází z manuálu programu [2]. Správné stanovení vstupních parametrů je proto velice důležité.

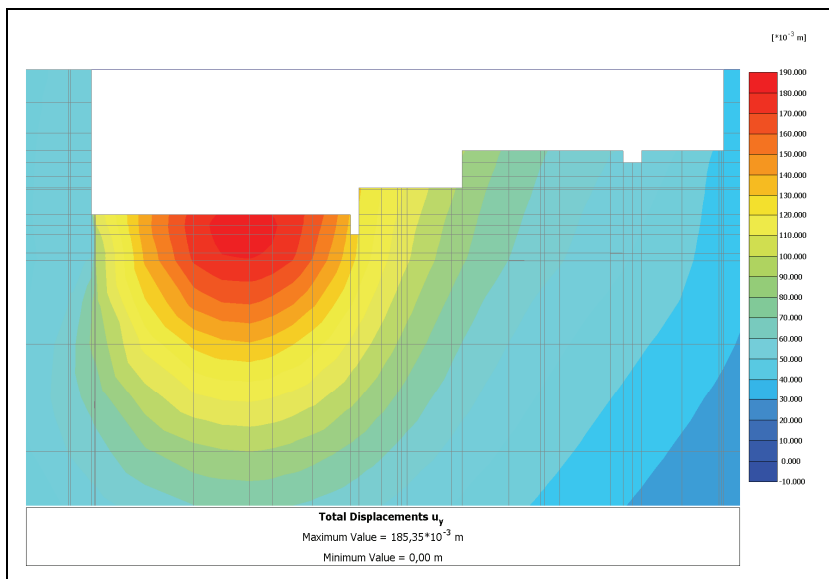
Hodnoty například pro tuhé jílly mohou být až dvojnásobně vyšší. Podle poznatků získaných při modelování zejména hlubokých stavebních jam hraje hodnota deformačního modulu velice významnou roli. Tento vliv byl ověřen na několika různých modelovaných stavbách. Po odtěžení horniny (deaktivace horniny v modelu) dochází k poměrně vysokému odlehčení a nárůstu deformací. Při nízkých hodnotách modulů deformace dochází ke zdvihnutí dna jámy v řádech stovek milimetrů. Při použití správného modulu deformace se tato hodnota výrazně snižuje a blíží se realitě. Vzednutí dna v modelu je vidět na obrázku č. 2 (100 násobně zvětšeno).



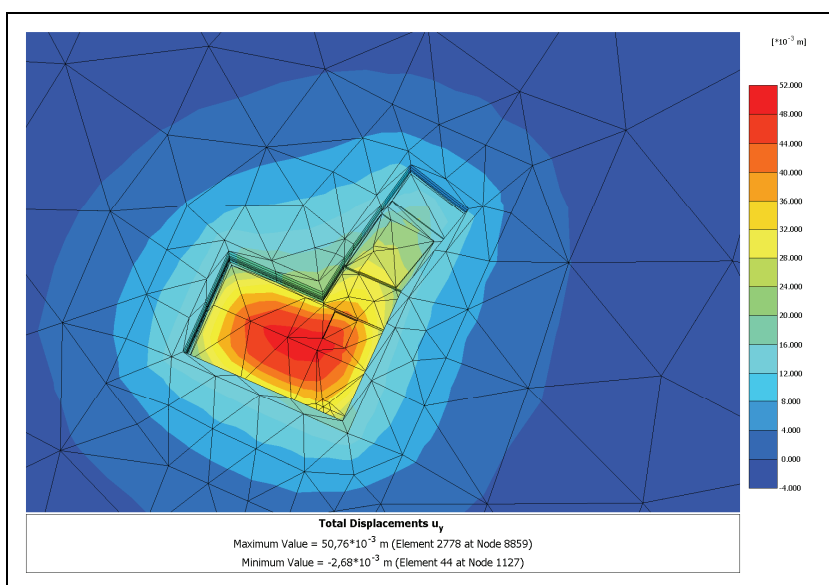
Obr. 2: Zdvih dna stavební jámy



Obr. 3: Zdvih dna stavební jámy

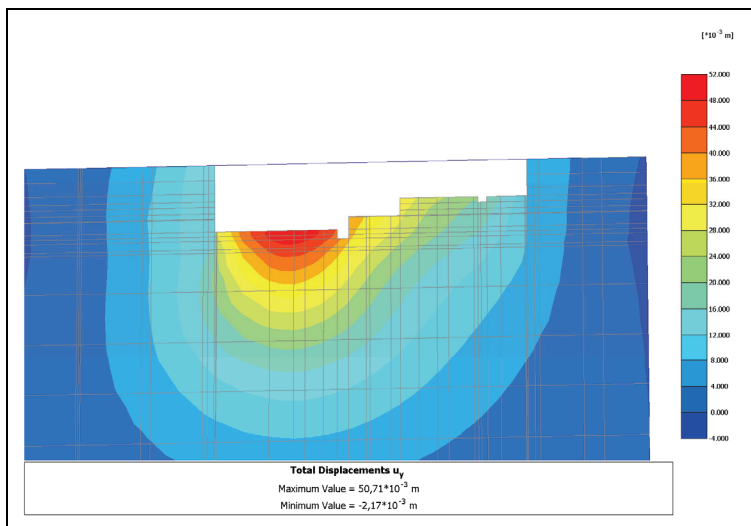


Obr. 4: Zdvih dna stavební jámy v podélném řezu



Obr. 5: Zdvih dna stavební jámy, zvýšený modul deformace

Na obrázcích 3 až 5 je vidět rozdíl vypočtených deformací (vzednutí) dna jámy při rozdílném modulu deformace. V prvním případě byla zadána hodnota oedometrického modulu  $i$  ve fázi odlehčení (cca 15 MPa). Zdvih dna jámy je až 185 mm (viz obr. č. 3 a 4). Při využití výsledků z laboratorních zkoušek, kde byly sledovány jak hodnoty pro zatížení vzorků tak i jeho odlehčení je vidět rozdíl. Hodnota oedometrického modulu na odlehčovací větvi je vyšší (cca 60 MPa). Tyto hodnoty byly využity při modelování výkopu stavební jámy (viz obr. č 4 a 5). Následně pro zatížení od budovy byl využit modul ze zatěžovací větve. Rozdíl deformací je poměrně významný cca 135 mm.



Obr. 6: Zdvih dna stavební jámy v podélném řezu, zvýšený modul deformace

## 4 ZÁVĚR

Úkolem příspěvku bylo prezentovat zkušenosti s prací s prostorovými modely. Holandská firma Plaxis bv nabízí dva programy pro 3D úlohy a to Plaxis 3D Tunnel a Plaxis 3D Foundation. Nyní jsou uváděny v jedné vylepšené verzi Plaxis 3D 2011. Tyto programy vytvářejí prostorový model s extruzí sítě konečných prvků do třetího směru. Rozdíl je ve směru protažení. U Plaxis Tunnel je to ve směru osy z (vodorovná osa) a u Plaxis 3D Foundationu je to ve směru osy y (svislá osa). S výhodou můžeme využít prostorový model pro řešení komplikovaných geotechnických úloh, což se prokázalo při modelování komplikovaných stavebních objektů.

Velmi zásadní vliv na celkové deformace má vhodná volba vstupních parametrů. U komplikovanějších staveb, spadající do třetí geotechnické kategorie, by se geotechnický průzkum a příprava projektu nesmí podceňovat. Poměrně často se stává, že projektant má velice málo informací o dané lokalitě z důvodů finančních úspor na průzkumu. Potom je nucen přistoupit k získávání různých vstupních hodnot, které nemusí odpovídat dané realitě. Nepřesnost vstupních parametrů pak vede k zavádějícím výsledkům. Citlivost na vstupy se projevuje zejména u matematických modelů, které se v dnešní době poměrně často využívají. Tyto problémy vznikají často nezkušeností nebo neznalostí s danou problematikou.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vypracován s podporou studentské grantové soutěže při VŠB-TUO SP2011/92. Autoři děkují za podporu při zpracování tohoto článku.

## LITERATURA

- [1] MIGOVÁ, Marcela., GLISNÍKOVÁ, Věra.: *Návrh a realizace složitých stavebních jam v městské zástavbě*, časopis Konstrukce 1/2008.
- [2] Reference Manuál Plaxis 3D Foundation, version 2
- [3] HULLA, Jozef., TURČEK Peter.: *Zakladanie stavieb*, Bratislava: Jaga Media, s.r.o., 2004. ISBN: 80-88905-99-0
- [4] ĎURIŠ, Lukáš.: *JUNIORSTAV 2010*. Brno: 2011. ISBN 978-80-214-4042-5.

## Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Marián Drusa, Ph.D., Katedra geotechniky, Stavební fakulta, Žilinská univerzita v Žiline.  
 Doc. Ing. Vladislav Horák, CSc., Ústav geotechniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně.